DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.6.281 中图分类号：TM912 文献标志码：A

PCM-风冷耦合的锂电池冷却系统优化设计

徐 晶，相飞飞，王 翔，徐 鑫，施苏航
(扬州大学机械工程学院，扬州 215000)

摘要：针对采用单一冷却方式的锂离子电池模组LIBM(lithium-ion battery module)冷却效果不佳的问题，提出了1种相变材料PCM(phase change material)风冷耦合电池冷却系统。讨论了不同入口空气风速IAV(inlet air velocity)、不同电池间隙BG(battery gap)和不同入口空气温度IAT(inlet air temperature)对LIBM内最高温度和最大温差的影响；以IAV、BG和IAT为设计变量，以最高温度和最大温差为目标函数，通过响应面模型对设计变量与目标函数进行了数值拟合；采用非支配排序遗传算法对响应面模型进行了优化预测；利用计算流体力学仿真对优化预测结果进行了验证。结果表明，经过优化后的冷却系统能将LIBM内的最高温度降低4.68 ℃(13.8%)，最大温差降低0.57 ℃(30.3%)。

关键词：电池热管理；相变材料；风冷；多目标优化

Optimization Design of PCM-Air Cooling Coupled Lithium-ion Battery Cooling System

XU Jing, XIANG Feifei, WANG Xiang, XU Xin, SHI Suhang
(School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 215000, China)

Abstract: In view of the poor cooling effect on a lithium-ion battery module (LIBM) when using one single cooling method, a phase change material (PCM)-air cooling coupled battery cooling system was proposed. First, the influences of different inlet air velocities (IAVs), battery gaps (BGs) and inlet air temperatures (IATs) on the highest temperature and maximum temperature difference of LIBM were discussed. Second, with the IAV, BG and IAT as design variables and the highest temperature and maximum temperature difference as objective functions, the design variables and objective functions were numerically fitted by a response surface model. Third, the non-dominated sorting genetic algorithm-II is used to optimize and predict the response surface model. Finally, the optimization and prediction results were verified by simulations based on computational fluid dynamics. Results show that the optimized cooling system can reduce the highest temperature in LIBM by 4.68 ℃ (13.8%) and the maximum temperature difference by 0.57 ℃(30.3%).

Keywords: Battery thermal management; phase change material (PCM); air cooling; multi-objective optimization

锂离子电池LIB(lithium-ion battery)是目前电动汽车动力源的第一选择，具有容量大、功率高的优点，然而随着电池能量密度的提高，LIB在高倍率放电时温度会迅速升高，容易发生热失控现象[1-6]。目前，电池生热机理已经得到大量的研究，Bernardi等[7]提出的电池经典生热模型使用十分广泛。LIB工作时需要合适的温度环境，否则会影响使用性能和安全性，目前主要以LIBM(lithium-ion battery module)内的最高温度和最大温差为热性能评价指标。风冷技术[8-9]是电池热管理系统BTMS(battery thermal management system)使用最成熟的冷却技术，具有结构简单、质量轻、成本低的优点。

收稿日期：2023-03-30；**修回日期：**2023-06-04，2023-07-17；
录用日期：2023-08-21；**网络首发日期：**2023-10-23
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52105344)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 52105344

杨朝蓬等[10]综述了风冷技术在电动汽车上的研究进展，指出国内外研究主要针对电池的内部流道、进出风口结构、冷却空气的参数进行设计及优化。许多学者发现单纯依靠风冷已经不能满足目前电池冷却的需要，于是提出了各种基于风冷的混合冷却系统[11-12]。强制风冷与相变材料 PCM(phase change material)冷却耦合是 1 种十分流行的混合冷却系统，它首先依靠 PCM 具有低熔点的特性，利用固体融化为液体的潜热来实现电池快速冷却，再利用强制风冷弥补 PCM 导热率不高的缺陷，及时带走系统累积的热量[13-15]。张甫仁等[16]对冷却系统入口流量、管道宽度等设计参数进行分析，发现不同设计参数对冷却效果有不同影响，最后通过非支配排序遗传算法 II NSGA-II(non-dominated sorting genetic algorithm-II)对设计参数进行优化设计，优化后的冷却系统可以使冷却板的最高温度和最大温差得到有效改善。

针对上述情况，本文提出了 1 种 PCM-风冷耦合电池冷却系统，讨论了入口空气风速 IAV(inlet air velocity)、电池间隙 BG(battery gap)和入口空气温度 IAT(inlet air temperature)对冷却系统的影响，以 IAV、BG 和 IAT 为设计变量，以 LIBM 的最高温度和最大温差为目标函数，利用 NSGA-II 对冷却系统进行了多目标优化设计。

1 模型建立

1.1 数学模型

LIB 产热率 Q 的计算采用 Bernardi 提出的生热率模型，表达式为

$$Q=\frac{I}{V_{\mathrm{b}}}\left[(U-U_0)+T\frac{\mathrm{d}U_0}{\mathrm{d}T}\right] \tag{1}$$

式中：I 为电流；V_{b} 为 LIB 的体积；U 为端电压；U_0 为开路电压；T 为温度；$\frac{\mathrm{d}U_0}{\mathrm{d}T}$ 为电压温度系数。

根据式(1)可以得到正、负极生热率 Q_{e} 和内核生热率 Q_{t} 的表达式分别为

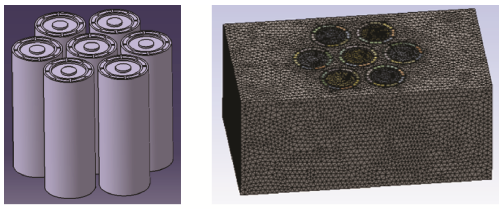
$$Q_{\mathrm{e}}=\frac{I^2R_{\mathrm{e}}}{V_{\mathrm{e}}} \tag{2}$$

$$Q_{\mathrm{t}}=\frac{I}{V_{\mathrm{t}}}\left(IR_{\mathrm{t}}+T\frac{\mathrm{d}U_0}{\mathrm{d}T}\right) \tag{3}$$

式中：R_{e} 为正负极端的电阻；V_{e} 为正、负极端的体积；V_{t} 为极柱体积；R_{t} 为极柱电阻。

1.2 物理与仿真模型

针对 1 组共 7 个 N18650CL 型 LIB 在环境温度为 25 ℃时以 3C 高倍率放电的工况进行研究。PCM-风冷耦合的电池冷却系统的物理和仿真模型如图 1 所示，该 LIBM 中的电池呈梅花形排列，各电池之间留有间隙，以使空气能够顺利通过，将热量带走。其中，电池外侧有铝制双层壳体包裹，在壳体内部填充有 PCM，2 层壳体之间通过 8 个矩形翅片相连。电池产生的热量一部分通过散热翅片传递至外层铝壳，通过空气对流散去；一部分通过内层铝壳传递至 PCM 中吸收。铝制双层壳体的内层壳体的内径为 18 mm，外层壳体的内径为 25 mm，壳体的厚度均为 1 mm。矩形翅片之间是沿着轴心方向均匀分布的，各个翅片之间的角度为 45°。PCM 选取熔点为 37 ℃的正二十烷，其具有相变时吸热能力强、导热性良好、价格低廉等优点，它的部分热力学和物理性质见表 1。空气流体域的尺寸为 160 mm×67 mm×90 mm，划分网格的基本尺寸选为 2 mm，单体电池部分划分网格的基本尺寸选为 1 mm，划分后的 LIBM 平均网格质量为 0.94 mm，最小网格质量为 0.74 mm。



(a)物理模型 (b)仿真模型

图 1 PCM-风冷耦合的电池冷却系统

Fig. 1 PCM-air cooling coupled battery cooling system

表 1 正二十烷性质

Tab. 1 Properties of n-eicosane

参数	数值
密度/(kg·ml^{-1})	7.9×10^{-4}
导热系数/[W·(m·K)$^{-1}$]	0.23
熔融热焓/(kJ·kg^{-1})	170.3
熔点/℃	37

1.3 仿真参数设置

本文使用 Fluent 模块针对不同 IAV、BG 和 IAT 下的冷却系统性能进行仿真研究，具体见表 2。其中，计算模型选用能量模型、K-epsilon 湍流速度模型和固液相变模型，初始环境温度设置为 25 ℃。LIB 的顶部与底部设置了恒定的换热系数，其参数值设置为 2 W/(m^2·K)，进风口设置为速度入口，出风口设置为自由压力出口，LIBM 的放电倍率为 3C，截止电压为 2.5 V，其中，LIB 的产热率设置采用自定义函数 UDF(user-defined function)。依据式(2)和式(3)进行计算编写，具体仿真流程及 UDF 编写方式在前期的研究[17-18]中进行了详细介绍。

表 2　仿真变量参数的设置

Fig. 2 Setting of variable parameters used in simulations

参数	IAV/(m·s^{-1})	BG/mm	IAT/℃
取值	2/4/6/8	28	25
	4	28/30/32	25
	4	28	20/25/30

1.4 单体电池实验验证

针对 N18650CL 型 LIB 生热特性进行研究，实验台架包括 LIB 若干、330-00A 恒温箱、RS05/11K 热电偶温度传感器、PX-100 放电负载、RC3561 内阻测试仪等。由于电池放电时存在温差，因此设置了 K1、K2、K3 共 3 个温度采集点。实验现场如图2 所示，具体实验步骤为：恒温箱温度设置为 25 ℃，电池使用 0.5C 恒流充电，直至达到截止电压 4.2 V，静置 1 h；然后将电池 3C 放电至截止电压 2.5 V，得到 3 个采集点温度随时间的变化。

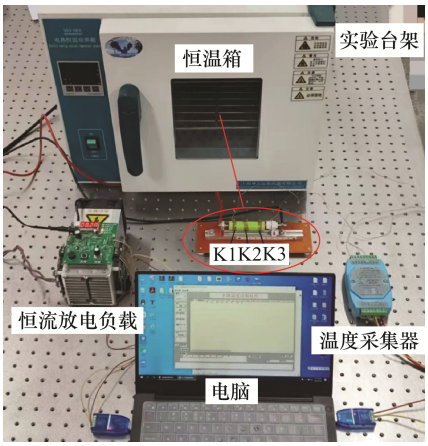


图 2　实验现场

Fig. 2 Experimental site

图 3 为单体电池实验和仿真结果对比，从图中可以看出，电池温度整体呈上升趋势，0~400 s 温度上升较快，随后温度上升速率相对缓慢，放电结束时电池温度超过 60 ℃，具有极大的安全隐患。电池温度仿真结果经过实验验证发现相对误差不超过 3%，说明该仿真模型具有较高的精度，满足后续 LIBM 的仿真分析需求。为了便于数据研究，采用 3 个测温点温度的平均值进行后续分析。

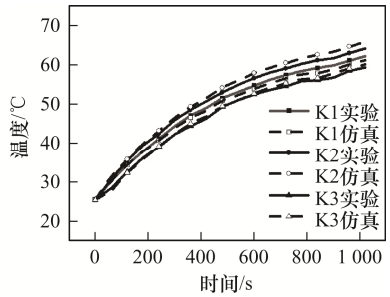


图 3　实验和仿真温度对比

Fig. 3 Comparison between experimental and simulated temperatures

2　不同参数仿真结果分析

2.1 不同 IAV 对冷却性能的影响

对于该冷却系统，首先研究不同 IAV 对冷却性能的影响，环境温度设置为 25 ℃，保持 BG 为 28 mm、IAT 为 25 ℃不变，IAV 分别为 2、4、6、8 m/s，对电池模组进行 3C 放电，图 4 为不同 IAV 下的仿真结果对比。从图 4 可以看出，当 IAV 为 2、4、6、8 m/s 时，LIBM 内的最高温度分别为 33.84、32.77、30.88、29.91 ℃，最大温差分别为 1.88、2.01、2.73、3.54 ℃。IAV 越大，LIBM 内的最高温度越低，IAV 从 2 m/s 增加至 4 m/s 时温差变化不大，当 IAV 继续增加时，会导致 LIBM 内电池之间的最大温差迅速扩大，LIBM 内温度均匀性变差。这是因为空气从进风口进入后仅能通过电池间的间隙流动，造成空气在流动过程中产生涡流，风速越大，涡流越大，空气不能从间隙中顺利通过，导致进出

风口风速差距变大，进风口处的电池得到了充分冷却，而出风口附近的电池冷却效果差。

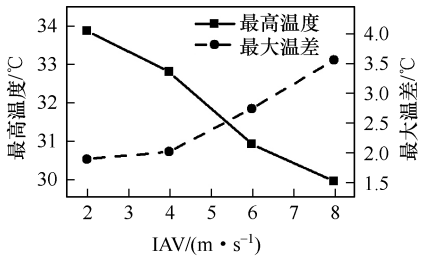


图 4 不同 IAV 下的仿真结果对比

Fig. 4 Comparison of simulation results under different IAVs

2.2 不同 BG 对冷却性能的影响

BG 也是影响冷却系统性能的 1 个重要因素，设置环境温度为 25 ℃，保持 IAV 为 4 m/s、IAT 为 25 ℃不变，BG 分别为 28、30、32 mm，对电池模组进行 3C 放电，图 5 为不同 BG 下的仿真结果对比。从图 5 中可知，当 BG 为 28、30、32 mm 时，LIBM 内的最高温度分别为 32.77、30.88、32.44 ℃，最大温差分别为 2.01、1.88、1.82 ℃。BG 越大，LIBM 内的最大温差越小，但是随着 BG 的增大，最高温度却先降低后增高，这是因为 BG 越大，空气越容易通过，空气流动过程中涡流现象减轻，进出口附近的电池都能得到有效冷却，LIBM 内温度均匀性变好，但是由于空间一定，过大的 BG 会导致边缘的电池与流道壁面的间隙过小，反而导致局部温度过高。

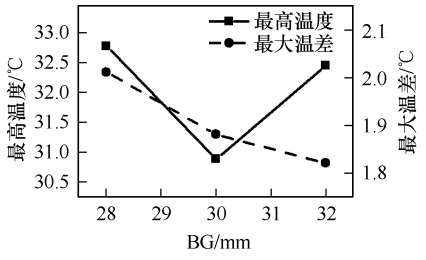


图 5 不同 BG 下的仿真结果对比

Fig. 5 Comparison of simulation results under different BGs

2.3 不同 IAT 对冷却性能的影响

冷却系统的冷却效果也会受 IAT 变化的影响，设置环境温度为 25 ℃，保持 IAV 为 4 m/s、BG 为 28 mm 不变，IAT 分别为 20、25、30 ℃，对电池模组进行 3C 放电，图 6 为不同 IAT 下的仿真结果对比。从图 6 中可知，当 IAT 为 20、25、30 ℃时，LIBM 内的最高温度分别为 28.3、32.77、36.96 ℃，最大温差分别为 2.07、2.01、1.89 ℃。IAT 温度越低，LIBM 内的最高温度越低，但是最大温差却随之增大，这是因为在一定程度上，较低温度的空气具有较好的冷却效率，但是会导致电池迎风面和背风面的冷却效果差距增大。

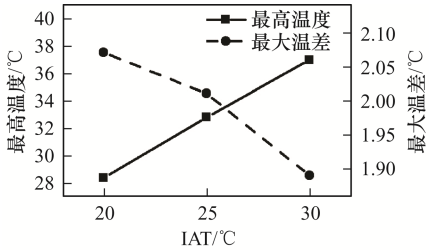


图 6 不同 IAT 下仿真结果对比

Fig. 6 Comparison of simulation results under different IATs

3 冷却系统参数优化

3.1 优化流程及实验设计

初始模型 LIBM 内的最高温度为 33.83 ℃，最大温差为 1.88 ℃，为全面寻求模型的最优冷却性能，对冷却系统参数进行优化设计。首先对各个变量进行取值划分，选取样本点后进行仿真计算，对计算结果进行响应面模型 RSM(response surface model)拟合，满足拟合优度≥0.95 后，进行 NSGA-II 的多目标优化，最后通过仿真计算判断优化结果的准确性，要求优化预测误差≤5%，具体流程如图 7 所示。

3.2 RSM 建立

RSM 是 1 种可靠的近似模型，以现有结果为依据，通过多项式拟合设计变量与目标函数的关系，具有计算简单、所需样本点少、精度高的优点[19]，其基本形式为

$$\tilde{y}=\beta_0+\sum_{i=1}^{n}\beta_i x_i+\sum_{i=1}^{n}\beta_{n+i}x_i^2+\sum_{i=1}^{n}\beta_{2n+i}x_i^3+\cdots+\sum_{i=1}^{n}\beta_{ij}x_i x_j \qquad i\neq j \tag{4}$$

式中：$\tilde{y}$ 为响应的近似值；β_0、β_i、β_{n+i}、β_{2n+i}…β_{ij} 为待定系数。

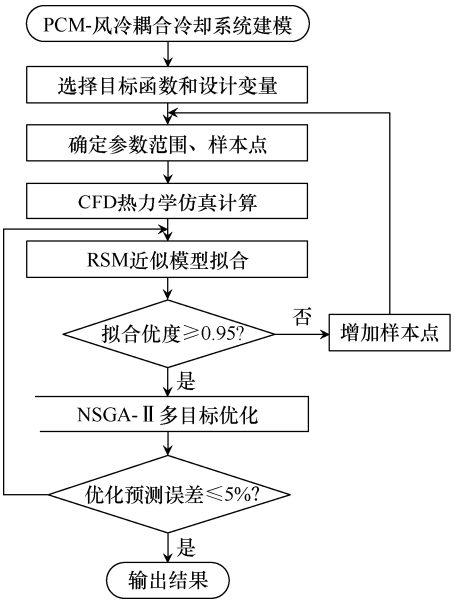


图 7　参数优化流程

Fig. 7 Flow chart of parameter optimization

模型建立流程如图 7 所示，首先要确定参数范围，经过上述分析可以发现，提高 IAV、降低 IAT 可以有效改善 LIBM 的最高温度，但是会造成最大温差变大；适当增大 BG 可以提高 LIBM 的温度均匀性，降低最大温差。经过综合考虑，对上述参数的范围进行限制，具体取值范围见表 3。其次采用拉丁超立方采样 LHS(Latin hypercube sampling)，其具有均匀分层的特性，可以在较少抽样的情况下得到尾部的样本值。然后在变量的取值范围内选取 30 个参数点，通过热力学仿真计算得到 30 个参数点对应的最高温度和最大温差，之后将参数点与函数值进行多项式拟合得到 RSM。最后对得到的模型进行验证，若拟合优度≥0.95，则认为模型是可靠的；反之，则增加样本点，重新进行模型拟合。结果表明 30 组样本数据拟合的 RSM，最高温度拟合优度为 0.954 96，最大温差的拟合优度为 0.979 96，满足使用要求。

表 3　参数取值范围

Tab. 3 Ranges of parameter values

设计变量	下限	上限
IAV/(m·s^{-1})	2	8
BG/mm	28	32
IAT/℃	20	30

3.3　NSGA-II 优化预测及验证

基于 RSM 拟合模型，选用 NSGA-II 算法[20]对 LIBM 内的最高温度 T_1 和最大温差 T_2 进行优化。自变量 x_1 代表 IAV，x_2 代表 BG，x_3 代表 IAT，数学模型表达式为

$$\begin{cases} T_1(\mathrm{IAV},\mathrm{BG},\mathrm{IAT}) = f_1(x_1,x_2,x_3) \\ T_2(\mathrm{IAV},\mathrm{BG},\mathrm{IAT}) = f_2(x_1,x_2,x_3) \end{cases} \tag{5}$$

通过 MATLAB 软件应用 NSGA-II 算法对冷却系统的结构参数进行优化，其中种群大小选为 50，最大评价次数设置为 1 000，进行计算求解后得到的结果如图 8 所示。从图中可知，A 区域内 LIBM 的最高温度很低，但是最大温差很高；C 区域内 LIBM 的最大温差较理想，但是最高温度偏高；B 区域则可以同时满足较低的最高温度及较小的最大温差。经过综合分析最终得到冷却系统 IAV=3.23 m/s、BG=30.81 mm、IAT=21.31 ℃时冷却效果最佳，LIBM 内最高温度为 28.97 ℃，最大温差为 1.26 ℃。为了验证优化结果的可靠性，将优化得到的冷却系统参数输入仿真模型计算，仿真结果的最高温度为 29.15 ℃，最大温差为 1.31 ℃，可以得到优化结果的相对误差均在 5%以内，证明了 NSGA-II 优化结果的准确性。

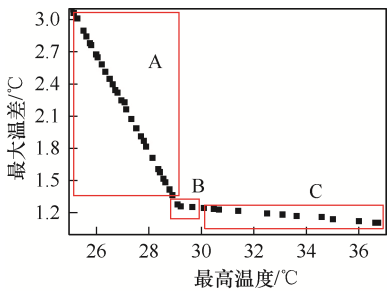


图 8　NSGA-II 优化结果

Fig. 8 Results optimized by NSGA-II algorithm

图 9 为冷却系统优化前后的冷却性能对比，从图中可以看出，优化后的 LIBM 最高温度降低了 4.68 ℃(13.8%)，最大温差降低了 0.57 ℃(30.3%)。这是因为经过优化后，流道内的空气能以较合适的速度从 LIBM 内电池间的间隙流过，大大减小了湍

流现象，使得出口位置的压降现象得到缓解，因此可以以较低能耗增强冷却系统的换热效率。同时，优化后的空气在流道内温度变化较小，使得出入口的换热效率差别不大，这也可以有效降低 LIBM 内的温差。

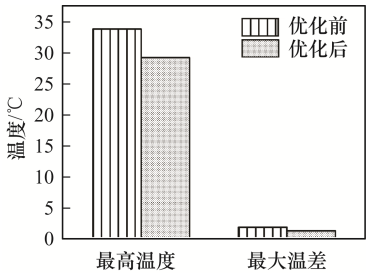


图 9 优化前后的冷却性能对比

Fig. 9 Comparison of cooling performance before and after optimization

4 结论

本文提出了 1 种 PCM-风冷耦合电池冷却系统，通过仿真研究了 IAV、BG 和 IAT 对 LIBM 内最大温度和最大温差的影响，并采用 NSGA-II 对冷却系统设计参数进行了优化，可以得到以下结论。

(1)在室温 25 ℃以 3C 高倍率放电可整体维持 LIBM 内的最高温度低于 35 ℃，最大温差低于 4 ℃。提高 IAV、降低 IAT 在一定程度上可降低 LIBM 内的最高温度，但会导致温差过大，适当增加 BG 可以降低最大温差。

(2)通过 NSGA-Ⅱ优化获得参数变量的最优解为 IAV=3.23 m/s、BG=30.81 mm、IAT=21.31 ℃。将得到的最优解进行热力学仿真，与预测结果的相对误差小于 5%，LIBM 内仿真最高温度为 29.15 ℃，最大温差为 1.31 ℃，相较于初始模型分别降低了 4.68 ℃(13.8%)和 0.57 ℃(30.3%)。

参考文献：

[1] 孙智鹏, 陈立铎, 徐梓荐, 等. 锂离子电池典型温度与倍率放电特性分析[J]. 电源技术, 2020, 44(8): 1090-1092, 1222.
Sun Zhipeng, Chen Liduo, Xu Zijian, et al. Analysis of typical temperature and rate discharge characteristics of Li-ion batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(8): 1090-1092, 1222. (in Chinese)

[2] Feng Xuning, Ouyang Minggao, Liu Xiang, et al. Thermal runaway mechanism of lithium ion battery for electric vehicles: A review [J]. Energy Storage Materials, 2018, 10: 246-267.

[3] 路玲, 汪缤缤, 胡健, 等. 基于翅片强化传热 PCM 锂电池热管理研究[J/OL]. 电源学报, 2023: 1-11. (2023-04-03)[2023-07-17]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=DYXB20230329002.
Lu Ling, Wang Binbin, Hu Jian, et al. Investigation on thermal management performance of PCM-fin structure for lithium-ion battery in charging-discharging condition [J/OL]. Journal of Power Supply, 2023: 1-11. (2023-04-03)[2023-07-17]. https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?dbcode=CJFD&dbname=CJFD&filename=DYXB20230329002. (in Chinese)

[4] Wu Xiaogang, Du Jiuyu, Guo Haoqi. Influence of capacity and energy density of lithium-ion battery on thermal reaction during high rate charging [J]. International Journal of Vehicle Design, 2020, 83(1): 1.

[5] 张蕾, 杨洋, 崔朝阳, 等. 环境温度对锂离子电池放电性能的影响[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 207-213.
Zhang Lei, Yang Yang, Cui Chaoyang, et al. Effects of ambient temperature on discharge performance of lithium-ion battery [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 207-213. (in Chinese)

[6] 舒俊豪, 武小花, 杨佳珞, 等. 新能源汽车动力电池安全问题分析及改进趋势综述[J]. 电源学报, 2025, 23(3): 354-362.
Shu Junhao, Wu Xiaohua, Yang Jialuo, et al. Review of analysis and improvement trend of new energy vehicle power battery safety issues [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(3): 354-362. (in Chinese)

[7] Bernardi D, Pawlikowski E, Newman J. A general energy balance for battery systems [J]. Journal of the Electrochemical Society, 1985, 132(1): 5-12.

[8] 陈凯, 侯竣升, 陈逸明, 等. 并行流道风冷式电池热管理系

统的导流板形状优化[J]. 化工学报, 2020, 71(S2): 55-61.
Chen Kai, Hou Junsheng, Chen Yiming, et al. Shape optimization of plenums in parallel air-cooled battery thermal management system [J]. CIESC Journal, 2020, 71(S2): 55-61. (in Chinese)

[9] Singh L K, Mishra G, Sharma A K, et al. A numerical study on thermal management of a lithium-ion battery module via forced-convective air cooling [J]. International Journal of Refrigeration, 2021, 131: 218-234.

[10] 杨朝蓬, 张宁, 段志宇. 车用锂离子动力电池风冷散热系统研究进展[J]. 电源技术, 2023, 47(1): 2-5.
Yang Zhaopeng, Zhang Ning, Duan Zhiyu. Research progress on air-cooling heat dissipation system of vehicle lithium ion power batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(1): 2-5. (in Chinese)

[11] Behi H, Karimi D, Behi M, et al. A new concept of thermal management system in Li-ion battery using air cooling and heat pipe for electric vehicles [J]. Applied Thermal Engineering, 2020, 174: 115280.

[12] Amalesh T, Lakshmi Narasimhan N. Cooling of a lithium ion battery using phase change material with air/dielectric fluid media: A numerical study [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy, 2020, 234(5): 722-738.

[13] Mehrabi-Kermani M, Houshfar E, Ashjaee M. A novel hybrid thermal management for Li-ion batteries using phase change materials embedded in copper foams combined with forced-air convection [J]. International Journal of Thermal Sciences, 2019, 141: 47-61.

[14] Jiang Kun, Liao Gaoliang, E Jiaqiang, et al. Thermal management technology of power lithium-ion batteries based on the phase transition of materials: A review [J]. Journal of Energy Storage, 2020, 32: 101816.

[15] Qin Peng, Liao Mengran, Zhang Danfeng, et al. Experimental and numerical study on a novel hybrid battery thermal management system integrated forced-air convection and phase change material [J]. Energy Conversion and Management, 2019, 195: 1371-1381.

[16] 张甫仁, 肖康, 鲁福, 等. 基于 NSGA-Ⅱ的锂离子电池液冷板的优化设计[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 145-150.
Zhang Furen, Xiao Kang, Lu Fu, et al. Optimal design of liquid cooling plate for lithium-ion battery based on NSGA-Ⅱ [J]. Journal of Chongqing Jiaotong University (Natural Sciences), 2023, 42(1): 145-150. (in Chinese)

[17] 丁亚军, 徐晶, 丁凡, 等. 圆柱锂电池表面自然对流换热系数仿真估算[J]. 电源技术, 2020, 44(9): 1256-1259.
Ding Yajun, Xu Jing, Ding Fan, et al. Simulation and estimation of natural convection heat transfer coefficient on surface of cylindrical lithium ion batteries [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2020, 44(9): 1256-1259. (in Chinese)

[18] 王翔, 徐晶, 陈新文, 等. 基于 VCHTC 的锂电池热力学精细化仿真[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 246- 252.
Wang Xiang, Xu Jing, Chen Xinwen, et al. Refined thermodynamic simulation of lithium battery based on VCHTC [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 246-252. (in Chinese)

[19] Box G E P, Wilson K B. On the experimental attainment of optimum conditions [M]// Breakthroughs in Statistics: Methodology and Distribution. New York, NY, USA: Springer New York, 1992: 270-310.

[20] Deb K, Pratap A, Agarwal S, et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 182-197.



徐晶

作者简介：

徐晶(1978—)，男，博士，副教授。研究方向：电动汽车热管理。E-mail：jingxu@yzu.edu.cn。

相飞飞(1999—)，男，硕士研究生。研究方向：电池热管理。E-mail：2660266905@qq.com。

王翔(1996—)，男，通信作者，博士研究生。研究方向：电池热管理。E-mail：549253463@qq.com。

徐鑫(1997—)，男，硕士研究生。研究方向：电池热管理。E-mail：940323026@qq.com。

施苏航(2000—)，男，硕士研究生。研究方向：电池热管理。E-mail：1817155158@qq.com。

(责任编辑：孙美菊)